

ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN

TOKO IMOROU Ismaïla

Laboratoire de Cartographie (LaCarto), Université d'Abomey-Calavi (UAC), 10BP1082 Cotonou-Houéyiho, Bénin.

RESUME

L'intérêt des forêts tropicales dans les négociations internationales sur le climat est lié à leur biodiversité et leur capacité de séquestration et de stockage de carbone. Le défi des pays tropicaux engagé dans la REDD+ est la connaissance du potentiel de stockage de carbone par leurs forêts. Le but de cette étude est d'estimer le stock de carbone dans les groupements végétaux de la forêt classée de Bellefoungou au Nord-Bénin. La méthodologie, axée sur l'approche phytosociologique, couplée aux équations allométriques d'estimation de la biomasse ligneuse aérienne de laquelle le stock de carbone est estimé, a été adoptée. Quatre groupements végétaux et un faciès comportant 112 espèces ont été discriminés. La densité et la surface terrière moyenne des arbres sont respectivement de 300,59 tiges/ha et 49,99 m²/ha. Les groupements établis dans les forêts claires et savanes boisées comportent les plus fortes valeurs de richesse spécifique, densité et surface terrière tandis que la composition floristique, le genre et la famille sont plus importants dans les forêts galeries. Le stock de carbone passe de 86 t/ha dans la classe de circonférence de 30-50 cm à 261 t/ha dans la classe de 90-110 cm. Le stock baisse ensuite de 261 t/ha de la classe de 90-110 cm à 13 t/ha pour la classe de 210-230 cm, soit une régression drastique de 249 t/ha. On note donc une variabilité du stock de carbone en fonction des classes de circonférence. 47 % des variations du carbone sont expliquées par celles de la densité des arbres ($D \leq 300$ tiges/ha). Vu l'enjeu économique lié au stock de carbone il est opportun d'estimer le coût financier de la teneur en carbone des groupements végétaux de la forêt classée de Bellefoungou pour bénéficier des marchés volontaires de carbone dans le cadre du processus de la REDD+.

Mots clés : densité des arbres, carbone, corrélation, forêt classée de Bellefoungou, Bénin.

ABSTRACT

Estimation of the aerial carbon stock in plant groups in Bellefoungou Classified forest in North Benin

The value of tropical forests in international climate negotiations is related to their biodiversity and their ability to sequester and store carbon. The challenge of tropical countries engaged in REDD + is knowledge of the carbon storage potential of their forests. The aim of this study is to estimate the carbon stock in the plant communities of the Bellefoungou classified forest in North Benin. The methodology based on the phytosociological approach, coupled with the allometric estimation equations of the above-ground woody biomass from which the carbon stock is estimated, was adopted. Four plant communities and one facies with 112 species were discriminated. The stems density and basal area are respectively 300,59 stems/ha and 49,99 m²/ha. The woodland and wooded savannahs have the highest values of specific richness, density and basal area, while floristic composition, genus and family are more important in gallery forests. The carbon stock increased from 86 t/ha in the circumference class from 30-50 cm to 261 t/ha in the 90-110 cm class. The stock then declined from 261 t/ha in the 90-110 cm class to 13 t/ha for the 210-230 cm class, a drastic 249 t/ha regression. There is therefore a variability of the carbon stock as a function of the circumference classes. 47% of carbon variations are explained by those of tree density ($D \leq 300$ stems/ha) in the Bellefoungou classified forest. Given the economic challenge of the carbon stock, it is appropriate to estimate the financial cost of the carbon content of the Bellefoungou classified forest plant communities to benefit from voluntary carbon markets as part of the REDD + process.

Key words: tree density, carbon, correlation, Bellefoungou Classified forest, Benin.

INTRODUCTION

Outre la conservation de la biodiversité, les forêts jouent un rôle essentiel à la fois pour l'environnement et le développement. En fait, par le mécanisme de photosynthèse, les forêts ont une énorme capacité d'absorption, de fixation et de stockage du carbone atmosphérique, tant dans leur biomasse que dans leurs sols. Dès lors, leur capacité à piéger le carbone de l'atmosphère et à le stocker, en fait un moyen essentiel de l'atténuation du réchauffement climatique qui constitue un des défis existentiels de l'humanité (Yuanying P. *et al.*, 2008 ; p. 2 ; FAO, 2018, p. 6 ; Toko Imorou I. *et al.*, 2018, p. 3). En effet, selon la FAO (2018, p. 6), les forêts représentent un immense réservoir de carbone et on estime le stock forestier mondial de carbone à plus de 4500 gigatonnes de carbone. La conservation de ce gigantesque réservoir devrait être la priorité de la communauté internationale. Selon les prévisions du GIEC (2007, p. 7), d'ici à 2030, les mesures d'atténuation liées aux forêts pourraient représenter plus d'un tiers des réductions d'émissions de CO₂. Les forêts constituent donc les principaux réservoirs terrestres de carbone susceptible de se comporter selon le cas en puits ou en source (Morrison I. K. *et al.*, 1993, p. 404). La connaissance du rôle des forêts dans le cycle du carbone est devenue un enjeu national, dans le cadre du protocole de Kyoto et des engagements pris par chacun des pays signataires (Ajonina G. et Ago E., 2013, p. 44). L'engagement du Bénin d'assurer sa part de responsabilité en matière d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques s'est traduit par la signature et la ratification de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, la signature du Protocole de Kyoto et l'élaboration du Programme d'Actions Nationales d'Adaptation sur les changements climatiques (Ajonina G. et Ago E., 2013, p. 44).

Mais jusqu'à présent, le Bénin n'a pas encore soumis un projet sur le marché carbone du fait en grande partie d'une insuffisance de données scientifiques de référence sur les stocks de carbone. Les rares travaux réalisés sur la comptabilité des stocks de carbone ont porté sur la modélisation des stocks de carbone (Guendehou S. *et al.*, 2012 ; 2014 ; Goussanou C. *et al.*, 2017 ; Sogbossi E., 2018) ; l'évaluation du stock de carbone dans les aires protégées (Issifou Moumouni Y. *et al.*, 2017a ; Houssou C. S. *et al.*, 2018), les terroirs villageois (Toko Imorou I. *et al.*, 2018) et les mangroves (Ajonina G. et Ago E., 2013). En outre, l'insuffisance de données scientifiques fiables sur les écosystèmes forestiers et leur productivité reste un handicap majeur pour le Bénin afin de réaliser les bilans de carbone devant permettre de préparer des projets acceptables sur le marché carbone. La forêt classée de Bellefoungou dans la zone de

transition soudano-guinéenne au Nord-Bénin est alors un cadre idéal pour évaluer la contribution des formations végétales à l'atténuation du réchauffement climatique dans un contexte où les terroirs riverains de cette forêt présentent de nombreux signes évidents de dégradation avancée de la flore et de la végétation. Le but de la présente recherche est de quantifier le stock de carbone aérien des groupements végétaux de la forêt classée de Bellefougou.

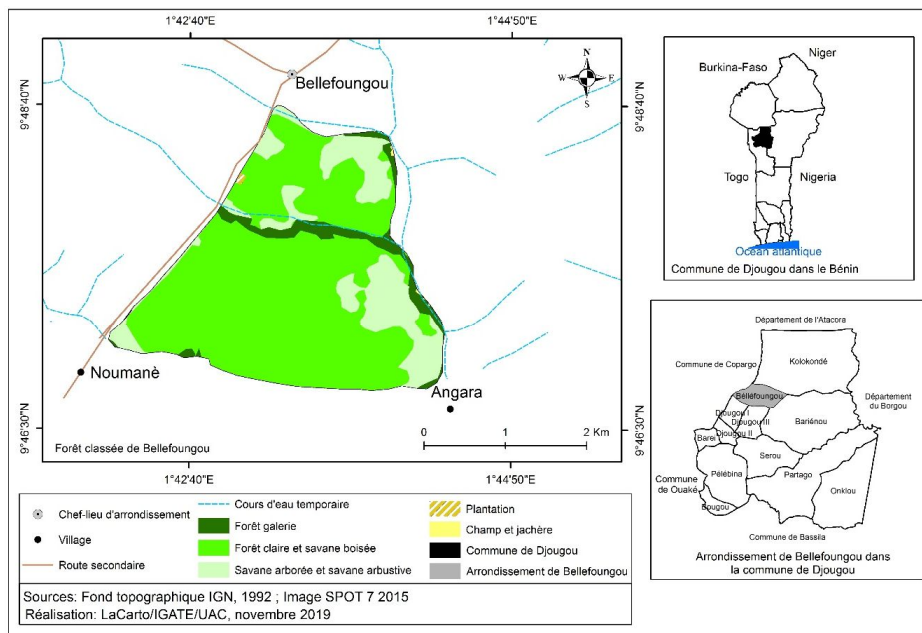
La structure du présent article comprend une introduction, un cadre d'étude, une méthodologie, des résultats, une discussion, une conclusion et des références bibliographiques. En outre, un résumé en français et en anglais présentent la problématique, les objectifs, la méthodologie, les résultats et les perspectives.

1. CADRE D'ETUDE

La forêt classée de Bellefougou est située entre 9°46'41'' et 9°48'34'' de latitude nord et entre 1°42'05'' et 1°44'26'' de longitude est. Elle s'étend sur une superficie de 1300,56 ha et est localisée dans l'arrondissement de Bellefougou (commune de Djougou). Le climat de la zone est de type soudano-guinéen avec une saison de pluie et une saison sèche. La moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 1200 mm et 1300 mm. La température moyenne annuelle est de 25 °C (ASECNA, 2018). Sur le plan phytogéographique, elle appartient à la zone de transition soudano-guinéenne et particulièrement le phytodistrict de Bassila (Adomou A.C., 2005, p. 73) (Figure 1). L'exploitation forestière, l'élevage et la carbonisation sont les principales activités qui sont menées dans le secteur d'étude.

ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN

Figure1 : Localisation de la forêt classée de Bellefougou



Source : Données de terrain, 2018

2. METHODOLOGIE

2.1. Méthodes de collecte des données

2.1.1. Données phytosociologiques

Les relevés phytosociologiques ont été effectués dans 55 placeaux installés au sein des différentes formations de la FCB, suivant la méthode sigmatiste de Braun-Blanquet (1932). La taille des placeaux a été déterminée en tenant compte des travaux effectués en milieu tropical par plusieurs auteurs (Toko Imorou I., 2008, p. 41 ; Arouna O., 2012, p. 39 ; Toko Mouhamadou I. *et al.*, 2013, p. 66) qui ont utilisé des surfaces variant entre 100 m² et 900 m² selon les formations végétales et les strates. L'aire de relevé est donc de 30 m x 30 m pour la strate arborescente des formations végétales. Pour les forêts galeries, des ajustements de 45 m x 20 m ont été effectués dans les dimensions des placeaux tout en respectant l'aire de relevé de 900 m². A l'intérieur de chaque placeau est installée une placette de 100 m² (10 m x 10 m) pour la strate herbacée.

L'identification des espèces est faite directement sur le terrain. Les spécimens des espèces non identifiées sur le terrain ont été récoltés et comparés à ceux de l'Herbier National du Bénin ou à partir des Flores (de

Souza S., 1998 ; Arbonnier M., 2002 ; Akoègninou A. *et al.*, 2006). La nomenclature adoptée est celle de la Flore Analytique du Bénin (Akoègninou A. *et al.*, 2006).

2.1.2. Données dendrométriques

Les données relatives à la circonférence de l'arbre et à sa hauteur ont été prises dans chaque placeau. La circonférence des ligneux ($C \geq 30$ cm) à hauteur d'homme (1,30 m du sol) est mesurée à l'aide d'un décimètre et la hauteur avec le clisimètre. Les coordonnées géographiques des placeaux sont prises à l'aide d'un GPS. Le type de formation végétal et la situation topographique ont été renseignés.

2.2. Méthodes de traitement des données

2.2.1. Individualisation des groupements végétaux

Les relevés phytosociologiques ont été soumis à une classification hiérarchique sur la base de présence-absence des espèces par relevé à l'aide du logiciel CAP (Community Analysis Package). Le dendrogramme ainsi obtenu a permis d'individualiser les différents groupements végétaux. Dans le présent travail, un groupement végétal est défini par au moins 10 relevés, tandis qu'un faciès est défini par moins de 10 relevés. Les espèces caractéristiques (Dufrene M. et Legendre P., 1997, pp. 349-356) ont été identifiées avec le logiciel PC ORD 14. Le test de Monte Carlo a permis de mesurer le degré de significativité du caractère indicateur de chaque espèce dans les groupements. Toutes les espèces ayant une probabilité inférieure à 0,005 sont retenues comme espèces caractéristiques du groupement.

2.2.2. Paramètres dendrométriques

La densité est le nombre total d'arbres vivants sur pied ($dbh \geq 10$ cm ou $C \geq 30$ cm) ramené à l'hectare (Toko Imorou I., 2008, p. 51). Elle est calculée selon la formule :

$D = N \times 10000/A$; avec : N : nombre total d'individus observés ; A : superficie de l'unité d'échantillonnage ramenée à l'hectare.

La surface terrière (G , m^2/ha) est la somme des sections des arbres ($dbh \geq 10$ cm ou $C \geq 30$ cm) mesurés sur l'écorce à 1,30 m du sol (Glèlè Kakaï R. et Sinsin B., 2009, p. 46). Elle est calculée selon la formule :

$G = \sum C_i^2 \times 10000/4\pi A$; avec : C_i : circonférence de l'arbre i ; A : superficie de l'unité d'échantillonnage ramenée à l'hectare.

La structure en classes de circonférence des arbres de chaque groupement végétal a été réalisée grâce au tableur Excel et ajustée à la distribution de Weibull dans le logiciel Minitab 14. La fonction de répartition de la distribution de Weibull est décrite par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \exp \left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c \right]$$

avec pour : a = Paramètre de position ; b = Paramètre d'échelle ou de taille ; c = Paramètre de forme lié à la structure observée.

2.2.3. Estimation de la biomasse aérienne ligneuse

La biomasse aérienne des arbres a été déterminée à l'aide du modèle pantropical de Chave J. *et al.* (2014, p. 3182) pour les forêts tropicales sèches. C'est un modèle des milieux où la précipitation moyenne est inférieure à 1 500 mm/an. L'équation du modèle est :

$$AGB_{est} = 0,0673 \times (\rho D^2 H)^{0.976}$$

Avec : AGB = biomasse aérienne ligneuse ; ρ = la densité spécifique de l'arbre en g/cm^3 ;

D = diamètre en cm et H = la hauteur en m.

La valeur de la densité spécifique (ρ) de chaque espèce est obtenue dans la base de données «Wood densities of trees species for tropical region of three continents» de Reyes G. *et al.* (1992, p. 5-14). Pour les espèces ligneuses du secteur dont la densité n'est pas obtenue des différentes bases de données, il a été choisi une valeur par défaut de la densité spécifique $\rho = 0,58 g/cm^3$ pour les forêts tropicales d'Afrique, comme le recommandent Reyes G. *et al.* (1992, p. 4).

2.2.4. Estimation du stock de carbone

Dans cette étude la biomasse aérienne ligneuse est le seul pool de carbone considéré. Le stock de carbone a été obtenu en multipliant la somme des biomasses aériennes par la fraction de carbone qui est de $FC = 0,487$ (Guendehou S. *et al.*, 2012, p. 85).

$$C = \sum_{classe=i} AGB_i \times FC_i$$

C = carbone en tonne par unité de surface,

AGB : Biomasse aérienne en t.MS,

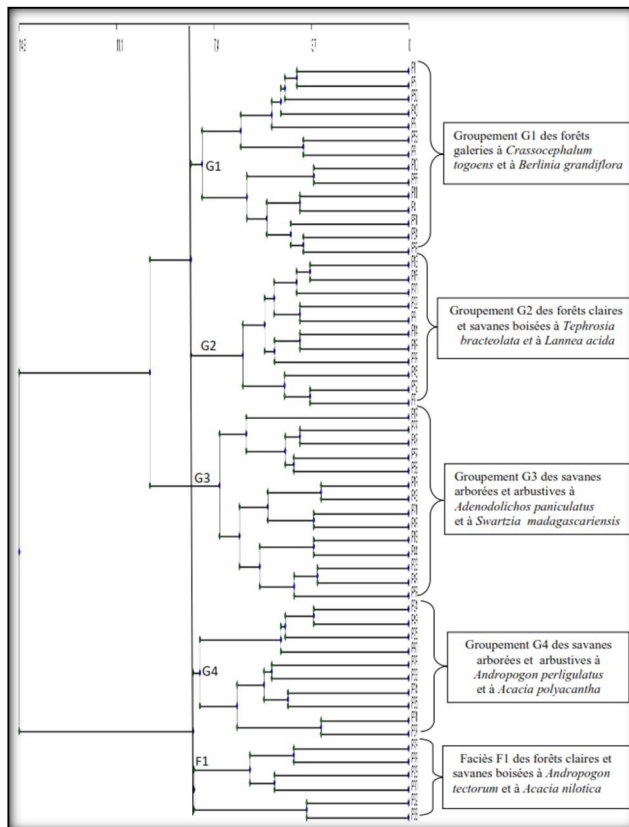
FC: Fraction carbonée de la biomasse sèche.

3. RESULTATS

3.1. Typologie des groupements végétaux

La matrice brute constituée de 55 relevés et de 112 espèces a permis d'individualiser par classification hiérarchique à 55 % de dissemblance quatre groupements végétaux et un faciès (Figure 2).

Figure 2 : Dendrogramme de classification des relevés en groupements végétaux



Source : Données de terrain, 2018

Le dendrogramme ainsi obtenu, a permis de distinguer quatre groupements végétaux et un faciès :

- le groupement G1 à *Crassocephalum togoens* et *Berlinia grandiflora* des forêts galeries est composé de 14 relevés établis au bas des versants, sur des sols limono-argileux ou limoneux ;

ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN

- le groupement G2 à *Tephrosia bracteolata* et *Lannea acida* des forêts claires et savanes boisées est composé de 11 relevés établis au sommet des versants sur des sols sablo-graveleux;
- le groupement G3 à *Adenodolichos paniculatus* et *Swartzia madagascariensis* des savanes arborées et arbustives est constitué de 14 relevés établis sur les versants et les sommets des versants sur des sols gravele-sableux ;
- le groupement G4 à *Andropogon perligulatus* et *Acacia polyacantha* des savanes arborées et arbustives est constitué de 10 relevés établis au sommet des versants sur des sols sablo-graveleux ;
- le faciès F1 à *Andropogon tectorum* et *Acacia nilotica* des forêts claires et savanes boisées est issu de 6 relevés établis sur les sommets des versants sur des sols sablo-graveleux.

3.2. Paramètres de diversité et structuraux des groupements végétaux

Dans la forêt classée de Bellefoungou, le cortège floristique est de 112 espèces réparties en 84 genres et 37 familles. Le tableau I présente les paramètres de diversité (richesse spécifique, générique et famille) et structuraux (densité et surface terrière moyenne des ligneux) des groupements végétaux identifiés.

Tableau I : Synthèse des paramètres de diversité et structuraux des groupements végétaux

Paramètres	Groupements végétaux									
	G1		G2		G3		G4		F1	
	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ
R	23,64	4,95	25,27	3,46	22,42	3,56	22,10	4,53	27,33	7,31
CF	74	-	63	-	70	-	69	-	67	-
G	63	-	55	-	62	-	57	-	55	-
F	34	-	28	-	32	-	29	-	25	-
D	267,46	102,99	333,37	101,50	226,98	085,92	251,11	125,40	424,07	144,25
G	36,74	20,71	55,42	55,08	32,49	17,63	38,35	33,40	86,98	48,48

Source : Données de terrain, 2018

Légende : R : richesse spécifique ; CF : Composition floristique ; G : Genre ; F : Famille ; D : Densité (tiges/ha) ; G : Surface terrière (m²/ha) ; Moy : moyenne ; σ : écart type ; G : groupement végétal ; F : faciès

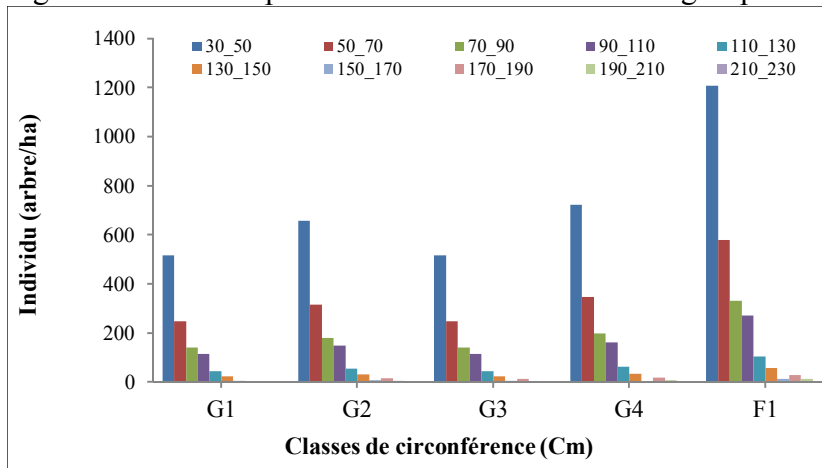
L'examen du tableau I montre que les groupements établis dans les forêts claires et savanes boisées (F1 et G2) comportent les plus grandes richesses spécifiques dans la forêt classée de Bellefoungou. Par ailleurs, la composition floristique, le genre et la famille sont plus importants dans le groupement G1 des forêts galeries.

Les forêts claires et savanes boisées (F1 et G2) possèdent les plus fortes densités et surfaces terrières (tableau I). La densité moyenne des arbres varie entre $226,98 \pm 85,92$ tiges/ha dans les savanes arborées et arbustives (G3) et $424,07 \pm 144,25$ tiges/ha dans les forêts claires et savanes boisées du faciès (F1), pour une moyenne globale de 301 tiges/ha. La surface terrière moyenne globale est de $49,99 \text{ m}^2/\text{ha}$. Elle est plus faible dans les savanes arborées et arbustives du groupement (G3) avec une valeur de $32,49 \pm 17,63 \text{ m}^2/\text{ha}$ et plus élevée ($86,98 \pm 48,48 \text{ m}^2/\text{ha}$) dans les forêts claires et savanes boisées du faciès (F1).

3.3. Classes de circonférence

La structure par classes de circonférence au sein des groupements végétaux est présentée sur la figure 3.

Figure 3 : Structure par classes de circonférence des groupements végétaux



Source : Données de terrain, 2018

Légende : G1 : groupement à *Crassocephalum togoens* et *Berlinia grandiflora*; G2 : groupement à *Tephrosia bracteolata* et *Lannea acida* ; G3 : groupement à *Adenodolichos paniculatus* et *Swartzia madagascariensis* ; G4 : groupement à *Andropogon perligulatus* et *Acacia polyacantha* ; F1 : faciès à *Andropogon tectorum* et *Acacia nilotica*.

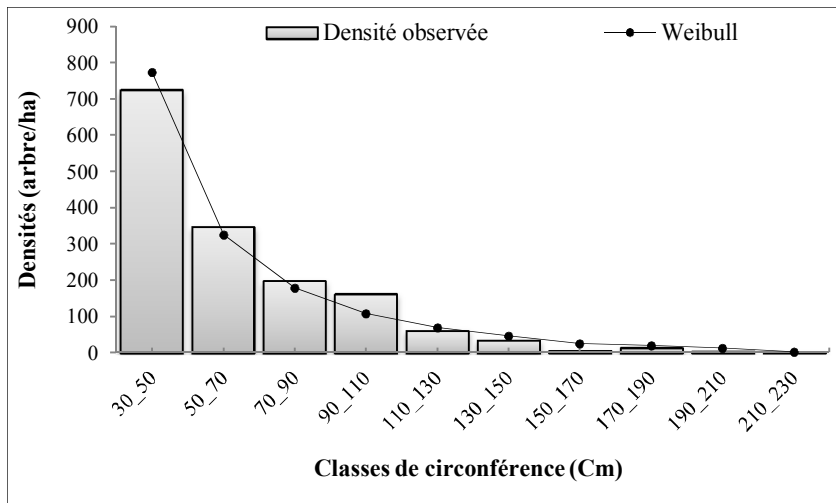
L'examen de la figure 3 montre globalement que les arbres de petites circonférences (30 cm à 50 cm) sont les plus nombreux dans les différents groupements végétaux. Cette tendance est plus prononcée dans le faciès F1

ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN

(1207 arbres/ha). Viennent ensuite les individus de circonférences comprises entre 50 cm et 70 cm avec 580 arbres/ha dans le faciès (F1). Les ligneux de circonférences comprises entre 90 cm et 130 cm sont faiblement représentés. Par contre on note une quasi absence des arbres de circonférences supérieures à 130 cm.

La structure par classes de circonférence de toute la forêt classée de Bellefoungou est présentée sur la figure 4.

Figure 4 : Structure par classes de circonférence de la FCB



Source : Données de terrain, 2018

La structure par classes de circonférence des ligneux du secteur d'étude présente une allure en "J renversée" avec un paramètre de forme c de la distribution de Weibull de l'ordre de 0,72, caractéristique des peuplements multispécifiques avec prédominance des individus jeunes ou de petites circonférences (Figure 4).

3.4 Variation du stock de carbone dans les groupements végétaux

Le tableau II et la figure 5 présentent respectivement les statistiques descriptives du stock de carbone et la variation du stock de carbone par groupement végétal dans la FCB.

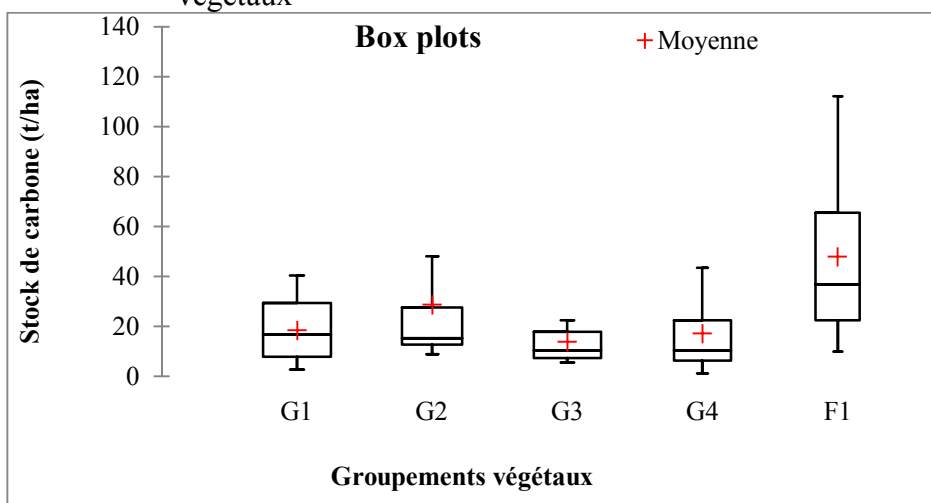
La boîte à moustaches a permis d'évaluer la variabilité spatiale du carbone dans les groupements végétaux. Les valeurs des 1^{er} et 3^e quartiles de la série et la moyenne ont favorisé l'analyse de la variabilité du stock de carbone.

Tableau II : Statistiques descriptives du stock de carbone (Données quantitatives)

Statistiques	G1	G2	G3	G4	F1
Minimum	2,610	8,840	5,605	1,074	9,860
Maximum	40,504	125,007	45,553	54,638	112,234
1 ^{er} Quartile	7,888	12,666	7,407	6,339	22,396
Médiane	16,901	15,317	10,365	10,402	36,711
3 ^{ème} Quartile	29,365	27,725	17,815	22,359	65,696
Moyenne	18,379	28,823	13,940	17,307	48,083
Coefficient de variation	0,666	1,122	0,741	1,002	0,732
Asymétrie (Fisher)	0,373	2,707	2,210	1,360	1,034

Source : Données de terrain, 2018

Figure 5 : Variation du stock de carbone (t/ha) dans les groupements végétaux



Source : Données de terrain, 2018

L'analyse de la figure 5 montre que le stock de carbone est différemment réparti dans les groupements végétaux de la forêt classée. Les valeurs des 1^{er} et 3^e quartiles les plus importantes (22,40 t/ha et 65,70 t/ha) sont enregistrées dans le faciès (F1) à *Andropogon tectorum* et *Acacia nilotica* des forêts claires et savanes boisées, alors que leurs plus faibles valeurs (6,34 t/ha et 17,81 t/ha) sont notées respectivement dans le groupement végétal (G4) à *Andropogon perligulatus* et *Acacia polyacantha* des savanes arborées et arbustives et le groupement G3 à *Adenodolichos paniculatus* et *Swartzia madagascariensis* des savanes arborées et arbustives (Tableau II). La plus forte moyenne (48,10 t/ha) du stock de carbone est notée dans le faciès (F1) avec un coefficient de variation de l'ordre de 0,73 t/ha, alors que la plus faible moyenne (13,94 t/ha) est enregistrée dans le groupement (G3) avec un coefficient de variation de 0,74 t/ha. Il faut

ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN

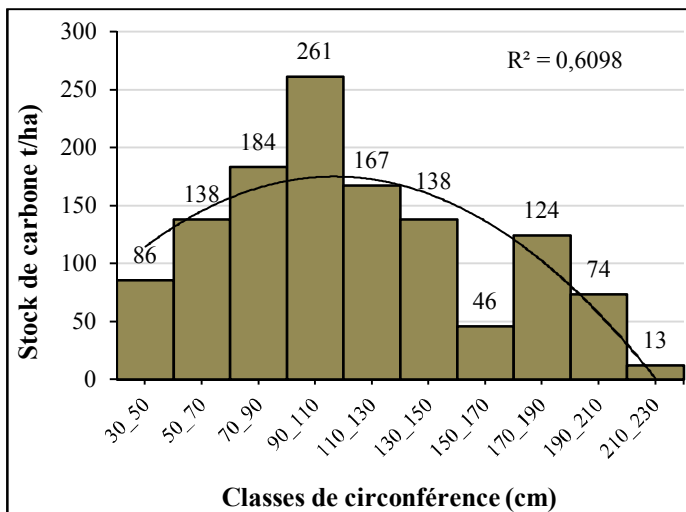
remarquer que toutes les valeurs de l'asymétrie de Fisher sont différentes de zéro et positives (Tableau II), ce qui indique que la distribution du stock de carbone dans les différents groupements végétaux de la FCB ne suit pas la loi normale de distribution, c'est donc une distribution asymétrique gauche.

3.5. Variation du stock de carbone par classes de circonférence

La figure 6 présente la variation du stock de carbone par classes de circonférence dans la FCB.

Il ressort de l'analyse que le stock de carbone croît progressivement des petites classes de circonférences (30 cm à 50 cm) vers les classes moyennes de circonférences jusqu'à atteindre son pic au niveau de la classe moyenne de (9 cm à 110 cm) avant d'amorcer une tendance baissière vers les classes supérieures de circonférences dans la FCB. Cela signifie que les gros arbres ne sont pas de bon prédicteurs de carbone. La distribution du carbone par classes de circonférence suit une allure en « cloche » caractéristique des distributions asymétriques gauches avec un coefficient de détermination ajusté $R^2 = 0,61$.

Figure 6 : Variation du carbone (t/ha) par classes de circonférence



Source : Données de terrain, 2018

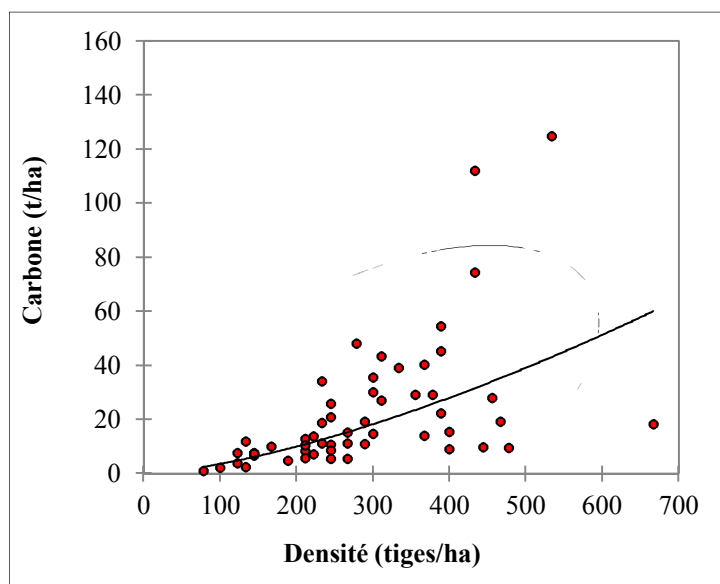
L'examen de la figure 6 montre que le stock de carbone varie de 13 t/ha à 261 t/ha dans la forêt classée de Bellefongou. Ce stock de carbone croît de 86 t/ha dans la classe de 30-50 cm à 261 t/ha dans la classe de 90-110 cm. Le stock baisse ensuite de 261 t/ha de la classe de 90-110 cm à 13 t/ha pour la classe de 210-230 cm, soit une régression drastique de 249 t/ha. On note donc une variabilité du stock de carbone en fonction des classes de

circonférence. Cette variation pourrait s'expliquer par la variation de la densité au sein des classes de circonférence.

3.6. Corrélation stock de carbone-densité des arbres

La figure 7 présente la corrélation entre le stock de carbone et la densité des arbres. Le test de Spearman réalisé indique une corrélation de 68 % au seuil de significativité de 5 %. Le coefficient de détermination de Spearman est de 47 % avec une probabilité $p < 0,0001$.

Figure 7 : Corrélation entre la densité des arbres et le stock de carbone



Source : Données de terrain, 2018

L'examen de la figure 7 montre une bonne corrélation entre la densité des arbres et le carbone. L'agglutination des valeurs de carbone autour de la droite de tendance entre les densités de 100 à 300 tiges/ha observée sur le nuage de points traduit une régularité dans la relation densité-carbone. On observe également que les valeurs du carbone évoluent lentement avec celles de la densité correspondante jusqu'à 300 tiges/ha avant de croître très rapidement pour les densités supérieures à 300 tiges/ha avec une dispersion des valeurs de carbone. Cette dispersion du nuage de points pour les densités supérieures à 300 tiges/ha témoigne d'une certaine irrégularité dans la relation entre le carbone et les fortes densités avec pour corollaire un risque de biais dans la prédiction.

Par ailleurs, 47 % des variations du carbone sont expliquées par celles de la densité ($D \leq 300$ tiges/ha) dans la forêt classée de Bellefoungou.

4. DISCUSSION

4.1. Paramètres de diversité et de structure

La classification hiérarchique des relevés phytosociologiques réalisés dans la forêt classée de Bellefoungou a permis de distinguer quatre groupements végétaux et un faciès. Au total, 112 espèces réparties en 84 genres et 37 familles ont été recensées soit environ 4 % de la flore du Bénin (Akoègninou A. *et al.*, 2006). Les groupements établis dans les forêts claires et savanes boisées (F1 et G2) comportent les plus grandes richesses spécifiques tandis que la composition floristique, le genre et la famille sont plus importants dans le groupement G1 des forêts galeries. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'échantillonnage et les conditions écologiques stationnelles. En effet, la végétation de la forêt classée de Bellefoungou est dominée par les forêts claires et savanes boisées par conséquent le nombre de relevés phytosociologique a été plus important dans cette unité. Par ailleurs, la diversité floristique des forêts galeries établis au bas des versants, sur des sols limono-argileux ou limoneux humides s'explique par un microclimat humide favorable à la diversité floristique. Ces résultats concordent avec ceux de plusieurs auteurs (Gonzalez P., 2001, p. 224 ; Wezel A., 2004, p. 41 ; Anthelme F. *et al.*, 2006, p. 2 ; Toko Imorou I., 2008, p. 130) pour qui, la composition floristique dépend en partie des conditions écologiques.

Dans l'ensemble du secteur d'étude, la densité moyenne des arbres au sein des différents groupements varie entre $226,98 \pm 85,92$ tiges/ha (G3) et $424,07 \pm 144,25$ tiges/ha (F1) avec une moyenne générale de 300,59 tiges/ha à l'échelle de la forêt classée. La surface terrière moyenne est de $49,99$ m²/ha avec des variations allant de $32,49 \pm 17,63$ m²/ha (G3) à $86,98 \pm 48,48$ m²/ha (F1). Dans la forêt classée de Wari-Marou, Mensah G.K. (2016, p. 46) a obtenu une densité variant entre 397,13 tiges/ha et 545,85 tiges/ha dans les forêts claires et les forêts galeries. Par ailleurs, dans la forêt classée de l'Alibori supérieur Akindede G. S. (2000, p. 53) a obtenu une densité de 259 tiges/ha et une surface terrière moyenne de $27,24$ m²/ha. Dans le bassin cotonnier du Bénin, la densité moyenne varie entre $124,62 \pm 114,65$ tiges/ha, alors que la surface terrière varie entre $4,16 \pm 4,24$ m²/ha (Toko Imorou I. *et al.*, 2018, p. 17). Sur les versants de la chaîne de l'Atacora au Nord-Bénin, Tente B.A. (2005, p. 87) obtient une densité moyenne toutes formations confondues de 393 tiges/ha. Dans l'Arboretum du centre national de floristique à Abidjan en Côte d'Ivoire, Kouamé A. P.-S. (2013, p. 28) a recensé 99 tiges/ha. La différence de valeur de densité pourrait s'expliquer par les conditions écologiques stationnelles et les activités anthropiques

(Toko Imorou I., 2008, pp. 137-138). De nombreux auteurs (Dourma M. *et al.*, 2012, p. 21 ; Gbesso F. *et al.*, 2013, p. 2 ; Issifou Moumouni Y. *et al.*, 2017b, p. 65) ont montré que les activités humaines ont un impact négatif sur la structure, la composition floristique et la dynamique des forêts naturelles en Afrique de l'ouest.

La structure par classes de circonférence en forme de “J” renversé obtenue sur l'ensemble des parcelles est typique aux forêts tropicales selon Kouamé A. P.-S. (2013, p. 36). En milieu naturel stable l'effectif des individus d'un peuplement forestier diminue régulièrement lorsqu'on passe d'arbres de petits diamètres aux plus gros arbres. Cette variation est attribuée à la forte régénération des espèces. Des résultats similaires sont obtenus par plusieurs auteurs (Tente B., 2005, p. 99 ; Wala K. *et al.*, 2005, p. 2 ; Toko Imorou I., 2008, pp. 138-139 ; Arouna O., 2012, p. 82 ; Konan D. *et al.*, 2015 ; p. 8878).

4.2. Estimation du stock de carbone

Dans la forêt classée de Bellefoungou, le stock de carbone croît progressivement des petites classes de circonférences (30 cm à 50 cm) vers les classes moyennes de circonférences (90 cm à 110 cm) avant d'amorcer une tendance baissière vers les classes supérieures de circonférences. Cela signifie que les gros arbres ne sont pas de bon prédicteurs. On note donc une variabilité du stock de carbone en fonction des classes de circonférence. Ces résultats corroborent ceux de Issifou Moumouni Y. (2016, p. 65) qui a démontré que le stock de carbone et le nombre d'arbre décroissent des classes d'individus de petits diamètres vers les individus de gros diamètres avec plus de 1358,11 t/ha pour la classe de diamètres compris entre 10 cm et 30 cm dans la forêt classée Wari-Marou. Il affirme que cette tendance peut s'expliquer par le caractère limité du modèle de Chave J. *et al.* (2005) utilisé dans son travail, qui n'est valable que pour les feuillus de diamètre de tiges allant de 5 à 156 cm et surtout par le nombre d'arbres à l'hectare. La variation du stock de carbone a été déjà soulignée par plusieurs auteurs dans les forêts tropicales. C'est le cas de Toung D. (2010, pp. 32-35) qui en évaluant les variations des stocks de carbone en fonction des classes de diamètre dans les forêts gabonaises affirme que le stock de carbone est fonction de la classe de diamètre la plus représentative. Mais il précise que les modèles basés sur le diamètre comme seul prédicteur, sous-estiment le carbone des arbres de petits diamètres alors qu'ils surestiment le stock de carbone des arbres de gros diamètres. Aussi Peltier R. *et al.* (2007, p. 47) constatent-ils dans un parc à karité du Nord-Cameroun que le stock de carbone et la productivité en bois croissent des petites classes de diamètres (0-15 cm ; 5,6 tC/ha) vers les grandes classes de diamètres (155 et plus ; 743

tC/ha). Kouamé A.P-S. (2013, p. 31) note aussi une variation du stock de carbone marqué par une croissance du stock des petites classes de diamètres vers les classes de gros diamètres. Les résultats de la présente recherche concordent avec ceux de Mugisho I. G. *et al.* (2016, p. 200) qui a observé que la plus grande quantité de carbone est stockée dans les classes de diamètres intermédiaires dans le jardin botanique de Bingerville en Côte d'Ivoire. Pour cet auteur, cette variation pourrait s'expliquer par la variation de la densité par classe de circonférence. Toute chose étant égale par ailleurs, 47 % des variations du carbone sont expliquées par celles de la densité ($D \leq 300$ tiges/ha) dans la forêt classée de Bellefoungou. Toung D. (2010, p. 36) ajoute que l'explication de cette variation réside dans le fait que le calcul de la biomasse est fonction de la densité des arbres (842) et du type de forêt. A l'échelle locale, la variation de la biomasse et du stock de carbone observée au sein des différents groupements végétaux et dans les classes de circonférence est liée à la structure de la végétation (Toko Imorou I., 2008, p. 142 ; Fayolle A. *et al.*, 2013, p. 33). A ce titre, certains auteurs notamment Toko Imorou I. (2008, p. 144) et Loubota Panzou G. J. *et al.* (2016, p. 513) ont expliqué les variations spatiales de la biomasse par la différence des compositions spécifiques et de la structure de la végétation. La variation de la biomasse et du stock de carbone du fait de la diversité du milieu pourrait aussi s'expliquer par d'autres variables notamment la surface terrière et l'allométrie hauteur-diamètre (Fayolle A. *et al.*, 2016, p. 513) non testés dans cette étude. D'autres facteurs de l'environnement pourraient également influencer la répartition spatiale de la biomasse et du stock de carbone. Par exemple, les forêts de type Miombo de moyenne altitude stockent plus de carbone par rapport à celles de basse et haute altitude (Loubota Panzou G. J., 2018, p. 17).

CONCLUSION

Au terme de cette étude, 4 groupements végétaux et un faciès ont été identifiés et analysés dans la forêt classée de Bellefoungou. Les groupements établis dans les forêts claires et savanes boisées comportent les plus fortes richesses spécifiques, densités et surfaces terrières tandis que la composition floristique, le genre et la famille sont plus importants dans les forêts galeries. La répartition par classes de circonférence révèle une prépondérance d'individus jeunes et de petites circonférences. Le stock de carbone varie d'un groupement végétal à un autre, avec la plus grande quantité enregistrée dans le faciès à *Andropogon tectorum* et *Acacia nilotica* des forêts claires et savanes boisées. On note également que le stock croît des arbres de petites circonférences vers les arbres de circonférences moyennes avant de décroître

significativement vers les gros arbres. Les variations de la densité des arbres influencent significativement les valeurs du carbone dans la forêt classée de Bellefoungou. Il urge donc de renforcer la surveillance et la gestion de cette forêt classée pour accroître la densité des arbres afin de renforcer les stocks de carbone et de transformer la forêt en un puits de carbone aérien.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADOMOU Aristide Cossi, 2005. *Vegetation patterns and environmental gradients in Benin : Implication for biogeography and conservation*. PhD thesis Wageningen University, 150 p.

AJONINA Gordon, AGO Expédit, 2013. *Etablissement du bilan carbone des mangroves des zones humides du Complexe Ouest du Sud-Bénin en vue de la préparation d'un projet MDP*. Eco-Bénin et Ecosystem Alliance, Cotonou, Bénin, 79 p.

AKINDELE Gnimassou Sylvain, 2000. *Possibilités d'aménagement durable de la Forêt Classée de l'Alibori Supérieur : structure et dynamique des principaux groupements végétaux et périodicité d'exploitation*. Thèse d'ingénieur agronome, FSA/UNB, Abomey-Calavi, Bénin, 162 p.

AKOEGNINO Akpovi, VAN DER BURG W. Joost, VAN DER MAESEN Laurentus Josephus Gerardus (Editors), 2006. *Flore analytique du Bénin*, Backhuys Publishers, Wageningen, 1034 p.

ANTHELME Fabien, WAZIRI MATO Maman, DE BOISSIEU Dimitri et GIAZZI Franck, 2006. « Dégradation des ressources végétales au contact des activités humaines et perspectives de conservation dans le massif de l'Air (Sahara, Niger) », *VertigO*, n°7, vol. 2, 23 p.

ARBONNIER Michel, 2002. *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest*. CIRAD et MNHN, Paris, France, 573 p.

AROUNA Ousséni, 2012. *Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la commune de Djidja au Bénin : implication pour l'aménagement du territoire*. Thèse de doctorat, EDP/UAC, 246 p.

ASECNA, 2018, *Données climatiques de la station météorologique de Natitingou, Bénin*.

BRAUN-BLANQUET Josias, 1932. *Plant sociology: The study of plant communities* (Facsimile of the edition of 1932). Translated by Fuller G. D. and Conard H. S. New-York: Heffner Publishing Company, 439 p.

CHAVE Jérôme, REJOU-MECHAIN Maxime, BURQUEZ Alberto, CHIDUMAYO Emmanuel, COLGAN Matthew, DELITTI Wellington,

ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN

DUQUE Alvaro, EID Tron, FEARNSIDE Philip, GOODMAN Rosa, HENRY Matieu, MARTINEZ - YRIZAR Angelina, MUGASHA Wilson, MULLER-LANDAU Hélène, MENCUCCINI Maurizio, NELSON Bruce, NGOMANDA Alfred, NOGUEIRA Euler Melo, ORTIZ-MALAVASSI Edgar, PELISSIER Raphaël, PLOTON Pierre, RYAN Casey, SALDARRIAGA Juan, VIEILLEDENT Ghislain, 2014. « Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees ». in *Global Change Biology*, n  20, pp. 3177–3190.

de SOUZA Simone, 1998, *Flore du Bénin : Nom des plantes dans les langues nationales béninoises*, Tome 3, Cotonou, Bénin, 423 p.

DOURMA Marra, WALA Kp  rkouma, GUELLY Kudzo Atsu, BELLEFONTAINE Ronald, DELEPORTE Philippe, AKPAVI S  mihinva, BATAWILA Komlan, AKPAGANA Koffi, 2012. « Typologie, caractéristiques structurales et dynamique des faciès forestiers fragiles à *Isobertinia* spp. en vue de leur gestion au Togo » in *Bois et forêts des tropiques*, n  313, vol. 3, pp. 19-33.

DUFRENE Marc, LEGENDRE Pierre, 1997. « Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical », *Approch. Ecol. Monogr.*, n  67, vol.3, pp. 345-366.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture), 2018. *La situation des forêts du monde : Les forêts au service du développement durable*, FAO, Rome, Italie, 28 p.

FAYOLLE Adeline, PANZOU LOUBOTA Grace Jopaul, DROUET Thomas, SWAINE MICHAEL Dalzell, BAUWENS Sébastien, VLEMINCK Jason, BIWOLE Achille, LEJEUNE Philippe, DOUCET Jean-Louis, 2016. «Taller trees, denser stands and greater biomass in semi-deciduous than in evergreen lowland central African forests» in *For. Ecol. Manage.*, pp. 374-4250.

GBESSO François Hou  hanou Gbodja, TENTE Hugues Agossou Brice, GOUWAKINNOU Nounagnon Gérard, SINSIN Augustin Brice, 2013. « Influence des changements climatiques sur la distribution géographique de *Chrysophyllum albidum* G. Don (Sapotaceae) au Benin » in *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, n  7, vol. 5, pp. 2007-2018.

GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [  quipe de rédaction principale, PACHAURI R. K. et REISINGER A. (publié sous la direction de)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

GONZALEZ Patrick, 2001. « Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel », in *Climate research*, n°17, pp. 217-228.

GUENDEHOU Sabin, LEHTONEN Ari, MANSOUROU Moudachirou, MÄKIPÄÄ Raisa, SINSIN Brice, 2012. « Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa », in *Southern Forests* (South Africa), n°74, vol. 2, pp. 77-88.

GUENDEHOU Sabin, LEHTONEN Ari, 2014. *Guidance for tree measurement in tropical forest ecosystems using non-destructive sampling to develop stem biomass and volume models*. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 287. 10 s. ISBN 978-951-40-2465-8(PDF).

GOUSSANOU Cédric, GUENDEHOU Sabin, ASSOGBADJO Achille, SINSIN Brice, 2017. « Application of site-specific biomass models to quantify spatial distribution of stocks and historical emissions from deforestation in a tropical forest ecosystem ». *Journal of Forestry Research*, n°29, vol. 1, pp. 205-213.

HOUSSOU Christophe, THOMAS Omer, DJEGO Julien, TOKO IMOROU Ismaïla, YABI Ibouaïma, AROUNA Ousséni, DJAOUGA Mama, ZAKARI Soufouyane, OROU MATILO TIMOTHEE BIO Augustin, 2018. *Cartographie de la biomasse forestière et évaluation du carbone séquestré par les aires protégées du Bénin : implications pour l'atténuation des changements climatiques et l'élaboration d'un projet REDD+*. Rapport technique et scientifique à mi-parcours. FNRSIT/MESRS, Cotonou, Bénin, 52 p.

ISSIFOU MOUMOUNI Yaya, 2016. *Dynamique du couvert forestier et évaluation des stocks de carbone dans la Forêt Classée de Wari-Marou au Bénin*. Mémoire de DEA en Géosciences de l'Environnement et Gestion de l'Espace, EDP/FLASH/UAC, Bénin.

ISSIFOU MOUMOUNI Yaya, TOKO IMOROU Ismaïla, AROUNA Ousséni, ZAKARI Soufouyane, DJAOUGA Mama, 2017a. « Estimation de la variabilité de la biomasse aérienne ligneuse en forêt tropicale sèche: cas de la forêt classée de Wari-marou au Centre-Bénin ». *Revue de géographie du Laboratoire Leïdi «DTD»*, n°17, pp. 38-56.

ISSIFOU MOUMOUNI Yaya, AROUNA Ousséni, ZAKARI Soufouyane, 2017b. « Diversité floristique et structure des formations végétales dans le district phytogéographique du Borgou-nord au Bénin (secteur de l'arrondissement de Bagou) », in *Notes scientifiques homme et société, Université de Lomé (Togo)*, n°7, pp. 63-80.

KAKAÏ GLELE Romain, SINSIN Brice, 2009. « Structural description of two *Isoberlinia* dominated vegetation types in the Wari-Marô Forest Reserve (Benin) », in *South Africa Journal of Botany*, n°75, pp. 43-51.

KONAN Djézou, BAKAYOKO Adama, PIBA Serge Cherry, BITIGNON Bley Guy Alain et TRA BI Fézan Honora, 2015. « Dynamisme de la structure diamétrique du peuplement ligneux des différents biotopes de la forêt classée de Yapo-Abbé, sud de la Côte d'Ivoire », in *Journal of Applied Biosciences*, n°94, pp. 8869–8879.

KOUMAME Akissi Paule-Sandrine, 2013. *Diversité végétale et estimation de la biomasse dans l'arboretum du centre national de floristique (Abidjan, Côte d'Ivoire)*. Diplôme d'études approfondies d'écologie tropicale, Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY, Abidjan, 78 p.

LOUBOTA PANZOU Grace Jopaul, 2018. *Biomasse et stocks de carbone en Afrique centrale : importance de l'allométrie des arbres*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique, 162 p.

LOUBOTA PANZOU Grace Jopaul, DOUCET Jean-Louis, LOUMETO Jean-Joël, BIWOLE Achille, BAUWENS Sébastien, FAYOLLE Adeline, 2016. « Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique) », in *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, n°20, vol. 4, pp. 508-522.

MENSAH Kocou Gildas, 2016. *Impact de la mise en œuvre du plan d'aménagement de la forêt classée de Wari-Marô sur la dynamique des formations végétales*. Mémoire de DEA, EDP/UAC, Abomey-Calavi, 93 p.

MORRISON I. K., FOSTER N. W., HAZLETT P. W., 1993. « Carbon reserves, carbon cycling, and harvesting effects in three mature forest types in Canada », in *New Zealand Journal of Forestry Science*, n°23, vol. 3, pp. 403-412.

MUGISHO Imani Gérard, ZAPFACK Louis, MWANGA MWANGA Ithe Jean-Claude, BOYEMBA Faustin, AMANI Christian, 2016. « Caractérisations Structurale, Floristique Et Biomasse Ligneuse Du Peuplement À *Hagenia abyssinica* Du Parc National De Kahuzi-Biega (Rift Albertin, RDC) », in *European Scientific Journal*, n°12, vol. 15, pp. 189-209.

PELTIER Régis, NJITI FORKONG Clément, NTOUPKA Mama, MANLAY Raphaël, HENRY Mathieu, MORILLON Vincent, 2007. « Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord-Cameroun », in *Bois et forêts des tropiques*, n°294, vol. 4, pp. 39-50.

- REYES Gisel, BROWN Sandra, CHAPMAN Jonathan, LUGO Ariel, 1992. «Wood densities of tropical tree species», in *Gen. Tech. Rep.* SO-88.
- SINSIN Brice, KAMPMANN Dorothea, 2010. *Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome I* : Bénin. Cotonou et Frankfurt/Main, 726 p.
- SOGBOSSI S. Erick, 2018. *Evaluation et spatialisation du stock de carbone des forêts communautaires au sud-est du Bénin (Afrique de l'Ouest)*. Mémoire de DEA, FSA/UAC, Abomey-Calavi, 135 p.
- TENTE Agossou Brice, 2005. *Recherche sur les facteurs de la diversité floristique des versants du massif de l'Atacora : secteur Perma-Toucountouna (Bénin)*. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, 252 p.
- TOKO IMOROU Ismaïla, 2008. *Étude de la variabilité spatiale de la biomasse herbacée, de la phénologie et de la structure de la végétation le long des toposéquences du bassin supérieur du fleuve Ouémé au Bénin*. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 241 p.
- TOKO IMOROU Ismaïla, AROUNA Ousséni, ZAKARI Soufouyane, DJAUGA Mama, THOMAS Omer, KINMADON Gérard, 2019. *Évaluation de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les aires protégées et terroirs villageois du bassin cotonnier du Bénin*. Conférence OSFACO : Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, Mars 2019, Cotonou, Bénin, 25 p. hal-02189556
- TOKO MOUHAMADOU Inoussa, TOKO IMOROU Ismaïla, GBEGBO Médard, SINSIN Brice, 2013. « Structure et composition floristiques des forêts denses sèches de la région des Monts Kouffé au Bénin », in *Journal of Applied Biosciences*, n°64, pp. 4787-4796.
- TOUNG Dany, 2010. *Estimation de la quantité de carbone stockée par une forêt en reconstitution*. École nationale des eaux et forêts du Cap-Estérias (Gabon) - Ingénieur des techniques des eaux et forêts, 95 p.
- WALA Kpérkouma, SINSIN Brice, GUELLY Kudzo Atsu, 2005. « Typologie et structure des parcs agroforestiers dans la préfecture de Doufelgou (Togo) », in *Science et changements planétaires/Sécheresse*, n°16, vol. 3, pp. 209-216.
- WEZEL Alexander, 2004. « Local knowledge of vegetation changes in Sahelian Africa - implications for local resource management », in *The Sahel Current politics in West Africa- The use of local knowledge in applied research-Participation in project planning and capacity building, Serein occasional paper 17*, Lykke A.M., Due M.K., Kristensen M. and, Nielsen I. (eds.), pp. 37-51.

**ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE AERIEN DANS LES GROUPEMENTS
VEGETAUX DE LA FORET CLASSEE DE BELLEFOUNGOU AU NORD-BENIN**

YUANYING Peng, THOMAS Sean, TIAN Dalung, 2008. « Forest management and soil respiration: Implications for carbon sequestration », in *Environ. Rev.*, n°16, pp. 93–111.